



UNIVERSITÉ DE LA MÉDITERRANÉE
AIX-MARSEILLE II
Faculté des sciences de Luminy



INSTITUT MEDITERRANEEN
D'OCEANOLOGIE



OPB205 : modélisation de la circulation océanique

Application du modèle ROMS sur la Mer Rouge

TEHAMI Ibrahim
1^{ère} année master océanographie physique biogéochimique

Enseignant: Andrea M.Doglioli

Présenté le : 04-05-2012

Promotion : (2011-2012)

SOMMAIRE

Abstract

Résumé

I- INTRODUCTION.....	3
II- GENERALITES.....	4
III- MATERIEL ET METHODE.....	5
1- Modèles numériques.....	5
1.1- Modélisation numérique de la circulation océanique.....	5
1.2- Modèles numériques ROMS	5
1.3-Equations résolues	5
2-Implémentation du modèle ROMS pour la mer rouge.....	6
2.1- Le choix de la zone d'étude.....	7
2.2- Les Conditions initiales et les forçages.....	7
3-Le lancement du modèle.....	9
IV- RESULTAT ET DISCUSSION.....	10
1-Stabilité du modèle.....	10
2-Variabilité saisonnière.....	11
3-Evolution saisonnière de la température et de la salinité.....	12
4-Les sections verticales de températures et de la salinité.....	14
V- CONCLUSION.....	14

Bibliographie

Abstract:

The exchange flow in the Red Sea entrance strait is highly seasonal with maximum outflow in winter. The seasonal reversal of the monsoon on and local coastal configuration combine in summer to force a radically different circulation pattern composed of a thin surface outflow, an intermediate inflowing layer of Gulf of Aden thermocline water and a vastly reduced outflowing deep layer. We identify basin-scale sea-surface tilt to the north due to variable thermohaline forcing. The resultant geostrophic eastward cross-channel flow interacts with the boundaries and creates upwelling and surface topography spatial patterns that drive the coastal jets. Upwelling-induced vortex stretching dominates the vorticity balance and governs the separation of the western boundary current from the western wall. The process ceases in the summer.

Model performance was assessed against few available observations in the basin like seasonal wind forcing and a series of strong seasonal or permanent eddy-like features. Comparisons of sea surface temperature and salinities were also made to assess model performance, they show generally good agreement with the main observed features of the circulation of the red sea.

Résumé :

Le flux d'échange d'entrée dans le détroit de la mer Rouge est très saisonnier avec un débit maximal en hiver. La reprise de la mousson saisonnière et la configuration côtière locale se combinent en été pour forcer un modèle de circulation radicalement différent composé d'un écoulement de surface mince, un écoulement intermédiaire entrant de golfe d'Aden et une autre eau qui sort en profondeur. Nous identifions l'échelle du bassin un gradient vers le nord en raison de différents forçage thermohaline.

Le débit géostrophique résultant interagit avec les frontières et crée un upwelling et les modèles de topographie de surface spatiales qui animent les jets côtiers. Ce processus n'apparaît pas en été.

La performance du modèle a été évaluée à partir des observations disponibles dans le bassin comme le forçage saisonnier vent et une série de fortes variations saisonnières ou permanentes des Eddies. Les comparaisons de la température de surface de la mer et la salinité ont également été faites pour évaluer la performance du modèle, ils montrent un accord généralement bon avec les principales caractéristiques observées de la circulation de la mer rouge.

I- INTRODUCTION :

La mer Rouge est un bassin long et étroit qui se trouve entre l'Afrique et l'Asie (Figure 1). Elle s'étend de 12.5°N à 30°N, une distance d'environ 2250 km, et une largeur moyenne de 280 km, elle a une profondeur maximale et moyenne de 2,8 km et 490 m, respectivement. Elle présente une forme relativement simple et une taille moyenne (4,5.106 km³ près d'un cinquième de la mer Méditerranée), reliée à l'océan Indien par le détroit de Bab el Mandeb, un canal très étroit et peu profond (une profondeur et largeur maximale de 160 m et 25 km respectivement), et à la Méditerranée par le canal de Suez. Entouré par des déserts secs, très chauds, sur toutes les côtes, la mer Rouge reçoit très peu de précipitation. En raison de la forte évaporation, les précipitations négligeables et le manque d'approvisionnement de ruissellement, la mer rouge est l'un des bassins océaniques les plus salés du monde. Sofianos, et al (2002) ont révisé les estimations du taux de P-E sur la mer rouge à $2,06 \pm 0,22$ m/an.

Les caractéristiques géographiques de la région mentionnées ci-dessus sont connues comme une grande influence sur les vents de surface sur la mer rouge. En général, les hautes montagnes sur les deux rives empêchent les vents moyens mensuels de surface à souffler à peu près parallèlement à l'axe longitudinal du bassin [Patzert, 1974]. Les vents des surfaces soufflent alternativement entre le nord-ouest au cours de la mousson du Nord (Décembre à Mars) et le sud-est pendant la mousson du sud (Juin à Septembre).

Suite aux ces différents forçages climatiques et atmosphériques, la mer rouge représente un modèle actif, complexe et tridimensionnel de circulation d'eau [Sofianos et Johns, 2007]. Un quasi-permanent tourbillon cyclonique est présent dans le nord de la mer Rouge [Clifford et al, 1997; Sofianos et Johns, 2007], tandis qu'une série de forts anticyclones a été observé en été dans la partie centrale de la mer Rouge avec des courants maximaux de l'ordre de 1 m.s⁻¹ [Sofianos et Johns, 2007].



Figure.1: la mer rouge.

II- GENERALITE SUR LA CIRCULATION EN MER ROUGE :

Du point de vu hydrodynamique, la mer rouge est une région complexe où coexiste différents types de masses d'eau qui présentent une forte saisonnalité de circulation à l'intérieur du bassin ,cette caractéristique est la résultante de différents forçages qui génèrent deux types de circulation en fonction des saisons . Pendant l'hiver, un apport de surface se produit au détroit de Bab El-mandeb.Après être transporté dans le bassin,cet écoulement s'intensifie le long de la limite ouest comme un courant de frontière fort avec des vitesses maximales qui varient avec l'importance de l'apport, Après son passage seulement 400 km dans la mer Rouge, près de 16° N, ce courant est interrompu et l'intensification du courant vers l'est est observée pour la plupart de la longueur restante du bassin. Bien que ce courant est un peu plus faible , et il interagit avec d'autres caractéristiques de la circulation méso-échelle des tourbillons cycloniques et anticycloniques, il représente le majeur écoulement de surface vers le nord dans le bassin. En été, le courant nord-ouest disparaît dans la partie sud de la mer Rouge. C'est au cours de cette saison que l'écoulement de surface s'inverse et un écoulement intermédiaire important de la plus fraîche et la plus froid GAIW (gulf Aden intermediate water) a lieu.

Les mécanismes impliqués dans la formation de la RSOW(redseaoutflow water) ne sont pas encore clair. Jusqu'à récemment, la masse d'eau qui s'écoule a été confondu avec le RSDW(redseadeep water). La plupart des chercheurs conviennent que la RSDW est formée pendant l'hiver dans le golfe de Suez [Maillard,1974; Wyrtki, 1974], où cette

eau obtient des valeurs extrêmes de salinité et coule au fond du bassin de la mer Rouge entraînant de l'eau ambiante. Le golfe d'Aqaba est considéré comme une source secondaire de RSDW [Wyrtki, 1974].

III- MATÉRIEL ET METHODES:

1- Modèles numériques

1.1- Modélisation numérique de la circulation océanique

A partir de la moitié du XXème siècle, les progrès au niveau du développement de la modélisation numérique de la circulation océanique ont vu le jour. Un des fondements de cette évolution a été l'assimilation entre les bases acquises de la prévision numérique du temps en météorologie et la circulation océanique. Le résultat de ce développement intensif et l'existence d'outils de recherche puissants basés sur les ordinateurs, permettent une interaction sans précédent entre les expériences physiques et numériques. Ces améliorations ont considérablement changé notre compréhension de nombreux aspects des mécanismes d'écoulements, permettant un traitement complet des processus spatio-temporels dans les écoulements des fluides.

1.2- Modèles numériques ROMS :

ROMS est un code numérique résolvant les équations de la mécanique des fluides géophysiques suivant les approximations de Boussinesq, hydrostatique et d'incompressibilité. Depuis plusieurs années, ROMS a connu sous l'impulsion de la communauté internationale d'utilisateurs, de nombreux développements qui font de lui un outil polyvalent tant dans la diversité des configurations employées (de la circulation côtière jusqu'à la circulation en bassin), que dans les moyens mis en œuvres (outils pré et post processing, Roms Tools <http://roms.mpl.ird.fr>).

1.3-Equations résolues :

Les équations résolues par les modèles sont des équations dites primitives :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f v + A_h \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + F_x + B_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - f u + A_h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + F_y + B_y \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (H u)}{\partial x} + \frac{\partial (H v)}{\partial y} = 0 \quad \text{avec} \quad H = h + \eta \end{array} \right.$$

La méthode de séparation du pas de temps permet également de résoudre des phénomènes lents en 3D comme les équations RANS (Reynolds et Navier-Stokes)

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv - \frac{\partial \bar{u}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{u}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{u}'w'}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu - \frac{\partial \bar{v}'u'}{\partial x} - \frac{\partial \bar{v}'v'}{\partial y} - \frac{\partial \bar{v}'w'}{\partial z}\end{aligned}$$

u, v, et w sont les composantes horizontales et verticale non turbulentes de la vitesse alors que u' , v' , w' sont les composantes turbulentes. f est le paramètre de Coriolis, P la pression, ρ_0 est la densité de référence de l'eau de mer selon l'hypothèse de Boussinesq. Le premier terme correspond a la variation locale de la vitesse en fonction du temps.

Dans le deuxième, troisième et quatrième terme sont représentées les advections horizontales. Le cinquième terme est le gradient de pression.

Le sixième terme est le terme de Coriolis, qui rend compte de l'influence de la rotation de la Terre.

Les trois derniers termes devront subir la "fermeture de la turbulence". Ainsi, on peut réécrire les termes turbulents tels que :

$$\begin{aligned}\bar{u}'u' &= -A_x \frac{\partial u}{\partial x}; & \bar{u}'v' &= -A_y \frac{\partial u}{\partial y}; & \bar{u}'w' &= -A_z \frac{\partial u}{\partial z}; \\ \bar{v}'u' &= -A_x \frac{\partial v}{\partial x}; & \bar{v}'v' &= -A_y \frac{\partial v}{\partial y}; & \bar{v}'w' &= -A_z \frac{\partial v}{\partial z}.\end{aligned}$$

Les équations de RANS peuvent s'écrirondc de la manière suivantes :

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + fv + A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} - fu + A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\end{aligned}$$

On notera A_h et A_z les coefficients de viscosité turbulente horizontale et verticale.

Les équations de conservation de la température et de la salinité sont données par les deux équations suivantes :

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} &= A_h^{tr} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + A_z^{tr} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_c}{\rho_0 C_p} \frac{\partial I}{\partial z} \\ \frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} &= A_h^{tr} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) + A_z^{tr} \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}\end{aligned}$$

Et pour l'équation d'état de l'eau de mer pour la masse volumique :

$$\rho = \rho(T, S, z)$$

2-Implémentation du modèle ROMS pour la mer rouge:

Après une série d'opérations d'inscription dans ROMS et Roms_tools, de téléchargement, et de décompression des différents fichiers , un test de compilation peut être effectué après avoir exécuté et compilé le fichier jobcomp situé dans le répertoire Run. Maintenant, nous pouvons fixer les coordonnées de notre domaine de calcul. Pour cela nous avons lancé le script Matlabad_findgeocoord.m.

2.1- Le choix de la zone d'étude:

Il est maintenant possible de lancer make_grid.m afin de créer notre grille, d'obtenir ses paramètres, mais aussi d'obtenir la figure de la bathymétrie (figure 2) qui montre un bassin allongé peu profond.

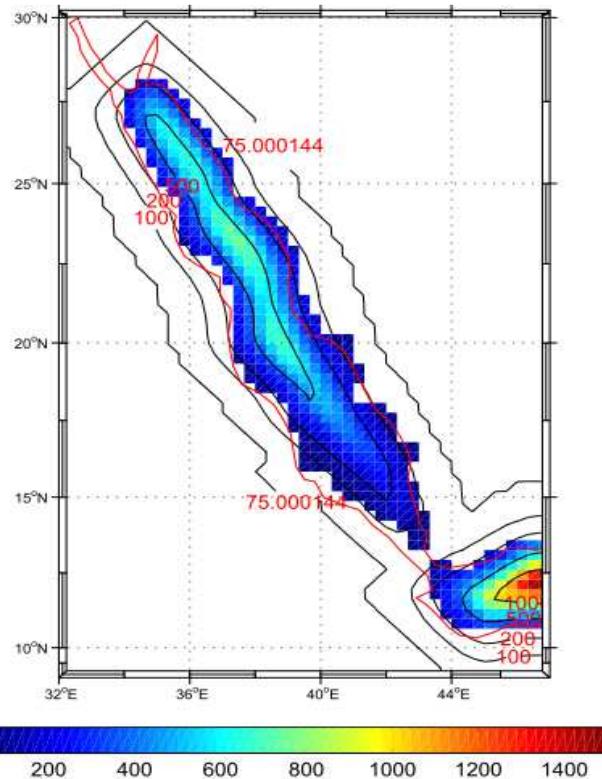


Figure.2: Carte bathymétrique de la mer rouge obtenue par le modèle Roms

Vu la puissance des machines mises à notre disposition (cluster), nous avons cherché à faire une grille, correspondant au domaine de calcul, de l'ordre de 105 mailles au maximum. Une résolution de $1/4^\circ$ est la plus possible pour une meilleure présentation. donc on a du choisir une zone en dessus de 15°N pour pouvoir augmenter la résolution.

2.2- Les Conditions initiales et les forçages :

Une fois la grille mise en place, les forçages, les conditions initiales et aux frontières doivent être fournis au modèle grâce à l'exécution des scripts make_forcing.m et make_clim.m. afin de calculer les différents forçages.

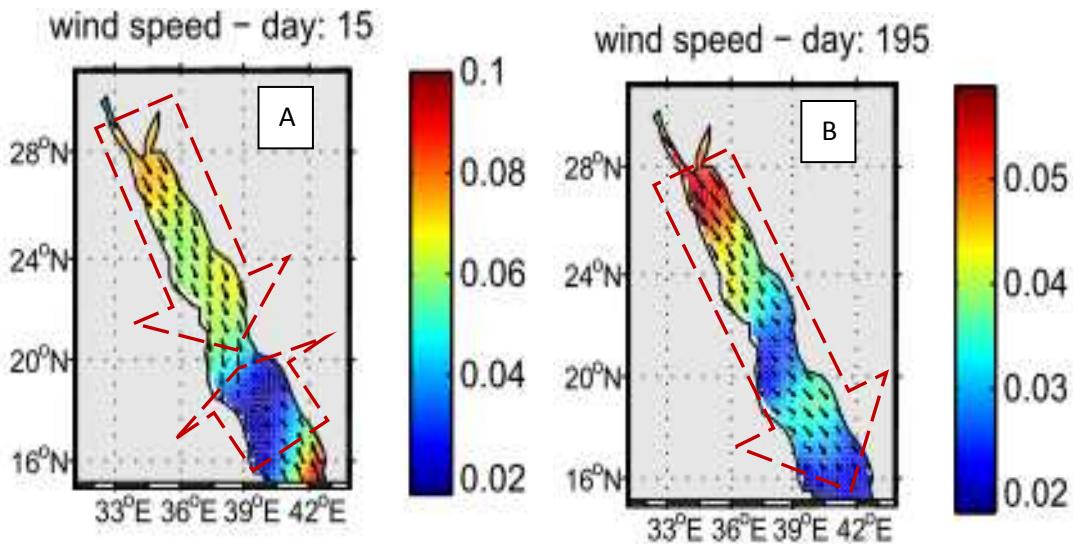


Figure.3: le forçage des vents dans la zone d'étude pour (A) hiver,(B) été.

La Mer Rouge connaît un forçage de vent fort et compliqué avec des vents de surface qui peuvent atteindre des vitesses de plus de 10 m /sec. En raison de l'existence de hautes chaînes montagneuses le long des côtes africaines et asiatiques, la direction des vents de surface est orientée géographiquement selon l'axe longitudinal du bassin.

Pendant l'hiver deux régimes de vent sont présents, l'un dans la partie nord de la mer Rouge et un dans la partie sud. Le premier est influencé par le système météorologique de la Méditerranée orientale [Pedgley, 1974] où il souffle du nord-ouest tout autour de l'année.

Dans la partie sud du bassin du vent est contrôlé par le système de Mousson indienne, et il s'inverse du sud-est pendant l'hiver (Octobre à Mai) au nord-ouest pendant l'été (Juin à Septembre). donc, il est bien évident que le forçage saisonnier du vent joue un rôle primordial pour la circulation de la mer Rouge.

Ces forçages saisonniers sont similaires à ceux obtenus par le modèle MICOM dans le papier de Sofianos et Johns,2003 telle que la figure suivante :

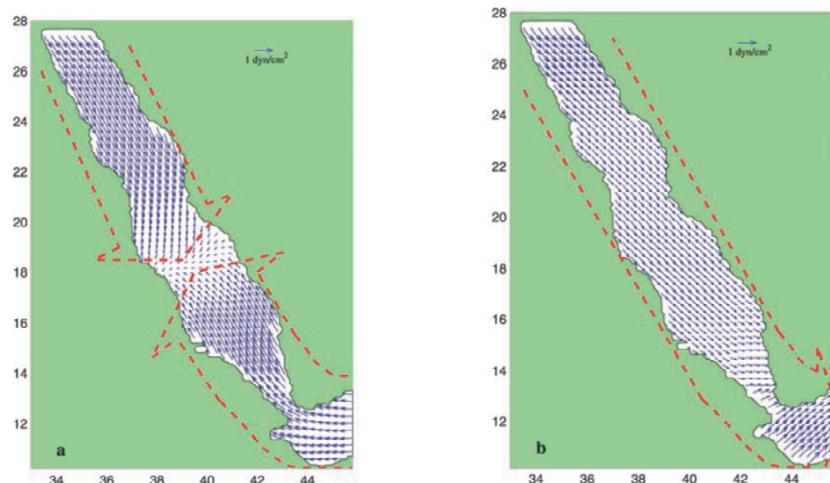


Figure.4:variation du vent pour (a) Janvier et (b) Juillet à partir de la climatologie.COADS

La figure suivante montre des conditions initiales de la température et de salinité:

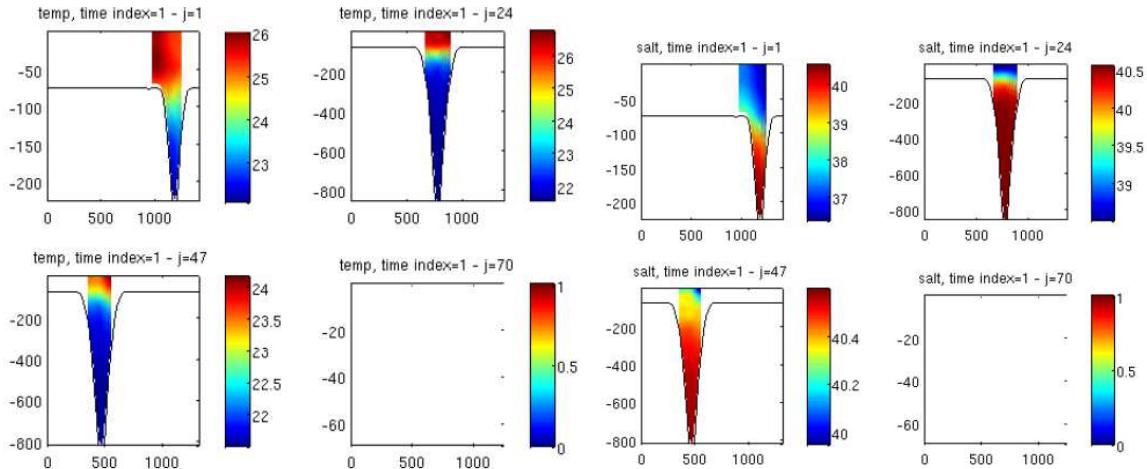


Figure.5: les conditions initiales de température et de salinité index 1

Ces conditions initiales montrent une température de surface plus importante jusqu'à plus de 26°C .à partir de 200m une température constante est observé. tandis que la salinité est beaucoup plus supérieure en profondeur qu'en surface sur toute la colonne d'eau.

3-Le lancement du modèle:

Les pas de temps internes et externes seront calculés sur la base du critère CFL à l'aide du script MATLAB ad_cfl.m. On obtient alors les valeurs nécessaires au bon fonctionnement de notre modèle.

Avant la compilation du modèle une dernière modification doit être effectuée sur les fichiers param.h et cppdefs.h afin de définir le nouveau domaine de calcul. Dans ce dernier script il est également important de vérifier la configuration des frontières (ouvertes ou fermées). Nous pouvons alors compiler le modèle avec l'instruction ./jobcomp.

Une fois le modèle compilé nous devons vérifier les valeurs de la grille verticale, le pas de temps externes, internes, la durée de simulation ainsi que la fréquence de sauvegarde des données sur le script roms_inter.in (simulation pluriannuelle).

Par la suite le modèle sera lancé par la commande qsub qsub_run_roms.sh pour une simulation pluriannuelle.

Les résultats obtenus pourront être visualisés grâce au script roms_gui.m.

Le tableau ci-dessous résume tous les paramètres choisis de notre modèle.

Tableau1:résumé des paramètres calculés.

Résolution	Frontières				Paramètre de la grille			
1/4	S	E	N	W	LLm	MMm	N	
	1	0	0	0	51	69	32	
Cordonnées	Long min	Long max	Lati min	Lati max	NTDFAST	NTIMES	DTE	NVAG
	31	44	15	31	60	480	5400	72

IV-RESULTATS ET DISCUSSIONS :

1-Stabilité du modèle :

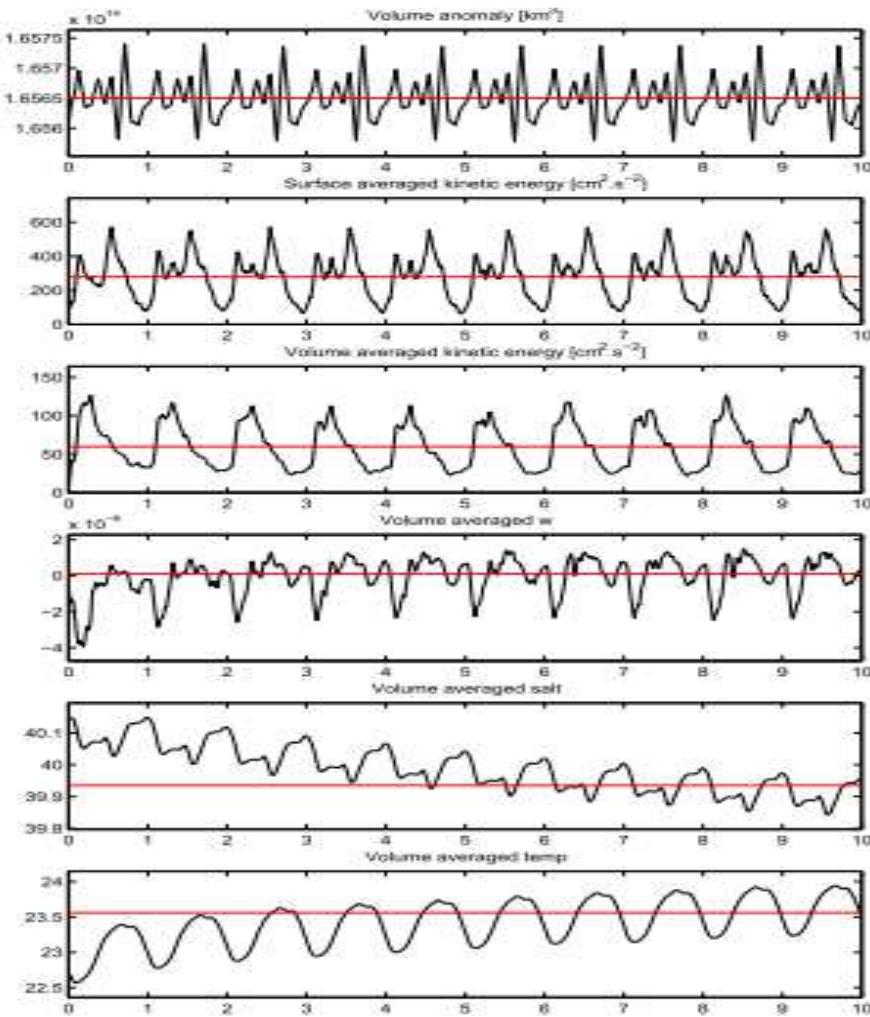


Figure.6: Diagnostique de la simulation (A : Le volume totale en km^3 ; B : L'énergie cinétique moyennée sur la surface ; C : L'énergie cinétique moyennée sur le volume ; D : La vitesse verticale moyennée sur le volume ; E : Salinité moyennée sur le volume ; F : La température moyennée sur le volume).

Le modèle a tourné pendant 10ans. Le script `roms_diags.m` et le script `plot_diags.m`, ont généré différents graphes sur les 10ans de simulation ce qui permet de suivre l'évolution et la stabilité du modèle.

Grâce à ce diagnostique, on remarque que le modèle se stabilise à partir de la septième année. Dans la suite de l'analyse des résultats nous allons nous intéresser plus particulièrement à la dixième année.

2-Variabilité saisonnière :

Dans cette partie nous nous intéresserons aux variabilités saisonnières des tourbillons, comment évolue la température, les champs de courant et la salinité afin de mettre en évidence un schéma global. Nous verrons que cette forte variabilité temporelle est liée à la variabilité saisonnière de différents forçages.

L'application de modèle Roms sur la mer rouge a permis de faire une comparaison avec les résultats obtenu par le modèle MICOM appliquée par Sofianos et johnson

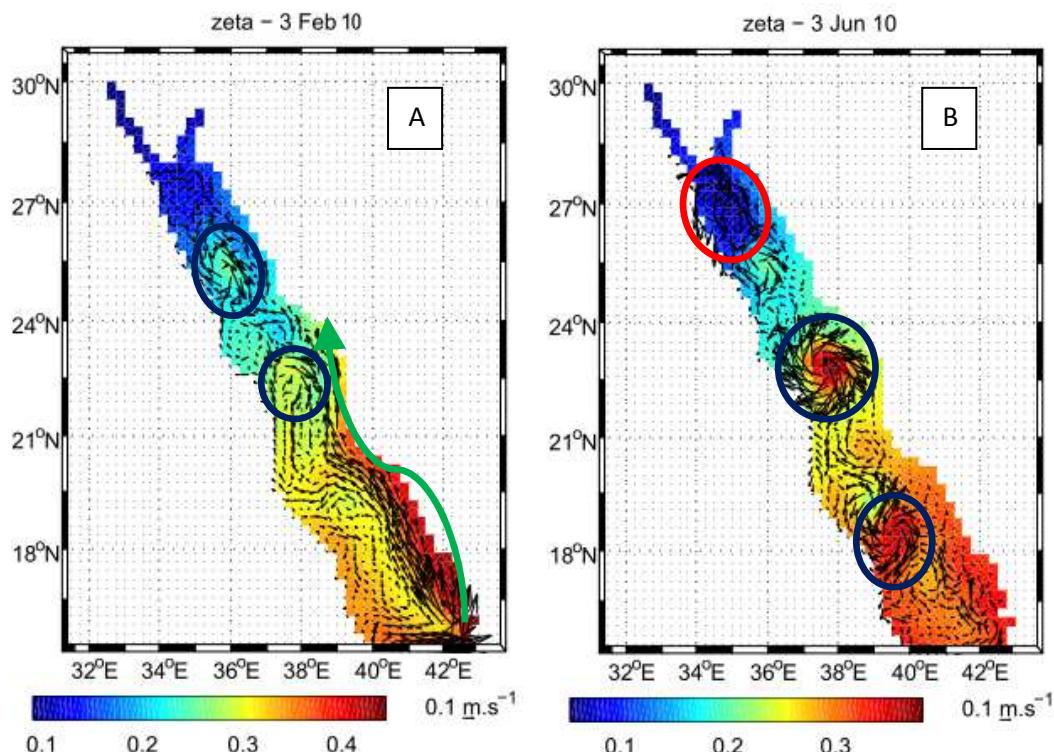


Figure.7 : représentation des tourbillons en fonction de l'élevation (A)hiver,(B)été
C. rouge :tourbillons cycloniques, C.bleu :tourbillons anticycloniques

Ces résultats montrent effectivement une très grande saisonnalité tourbillonnaire cyclonique et anticyclonique durant l'hiver et l'été.

En été dans la partie nord de la mer Rouge, à l'exception d'un grand tourbillon cyclonique plus allongé permanent qui domine le champ de la circulation à 27°N, les deux autres tourbillons anticycloniques sont présents au centre du bassin à 23°N et au sud à 18°N. Les autres caractéristiques présentes dans la région sont plus faibles et plus petits, et la plupart d'entre eux ont un caractère transitoire.

En hiver les phénomènes tourbillonnaires sont très abondants sur tous le bassin ainsi on peut remarquer un courant de frontière qui s'intensifie vers l'est à partir de 15°N. Bien que celui-ci est un peu plus faible et plus variable au nord que celle du sud, et il interagit avec d'autres caractéristiques de la circulation (méso-échelle des tourbillons cycloniques et anticycloniques) présentes dans la partie centrale et au nord du bassin, il représente majeur écoulement de surface vers le nord dans le bassin. En été, ce courant nord ouest disparaît dans la partie sud de la mer Rouge. Le modèle de circulation est maintenant relativement faible et plus

irrégulière qu' en hiver, car les forçages du vent et la circulation thermohaline sont plus faibles en été. Dans la partie nord de la mer Rouge, deux tourbillons permanents dominent le champ de la circulation, un petit tourbillon anticyclonique centrée autour de 23.5 N et une plus grande, plus allongée du gyre cyclonique autour de 25 N. Les deux coïncident d'une façon bien surprenante avec les observations disponibles dans la région ,à l'exception des des différents tourbillons qui pourraient être exister en dessous de 15°N de notre zone d'étude . D'une manière générale les tourbillons anticycloniques présentés par un niveau d'élévation de la surface de la mer plus important se trouvent dans le sud et diminuent progressivement vers le nord pour les deux saisons, tandis que les mouvements cycloniques à bas niveau d'élévation n'apparaissent qu'en période estivale au nord du bassin.

3-Evolution saisonnière de la température et de la salinité :

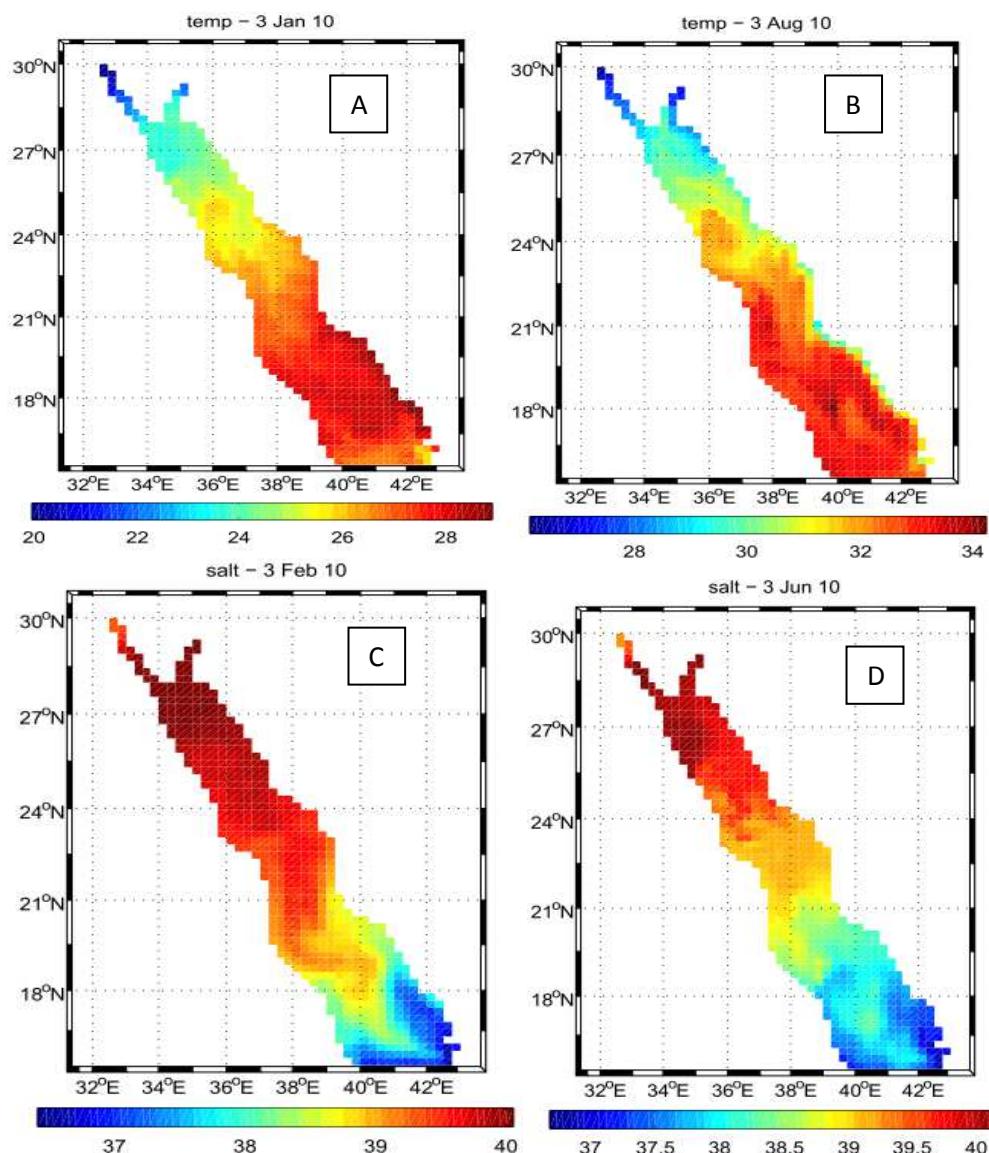


Figure.8: la température et la salinité de surface (A) T.hiver,(B)T.été,(C)S.hiver,(D)S.été

Une meilleure façon de la répartition de la température et la salinité et leur association avec la circulation et le forçage atmosphérique est représenté par la répartition saisonnière des deux champsprésentés dans lefigure 8

Pendant l'hiver, la variation de température est plus compliqué les valeurs les plus élevées se trouvent à la frontière orientale (en particulier dans le sud et le centre de la mer Rouge), ainsi qu'au centre du bassin et en diminuant vers les deux extrémités de la mer Rouge. Ceci est lié à la vitesse du vent très faible observée dans la région centrale de la mer Rouge à cette période de l'année. Tandis que pendant l'été la frontière orientale se caractérise par des températures inférieures beaucoup plus qu'en hiver (en particulier au sud et au centre du bassin). Cette différence est associée aux forçage des vents dominants qui induisent un upwelling(remontée d'eau froide en surface) côtier le long de la frontière orientale en été et undownwelling en hiver dans la partie sud du bassin, Cet effet est également reflète également la répartition saisonnière de la salinité, où les eaux de surface les plus douces se trouvent le long de la frontièreEst en été associée à la remontée de GAIW les eaux les plus douces et les plus froidespassent dans le bassin à cette époque de l'année.ces résultats sont confirmés par les observations faites par les mêmes auteurs précédents.

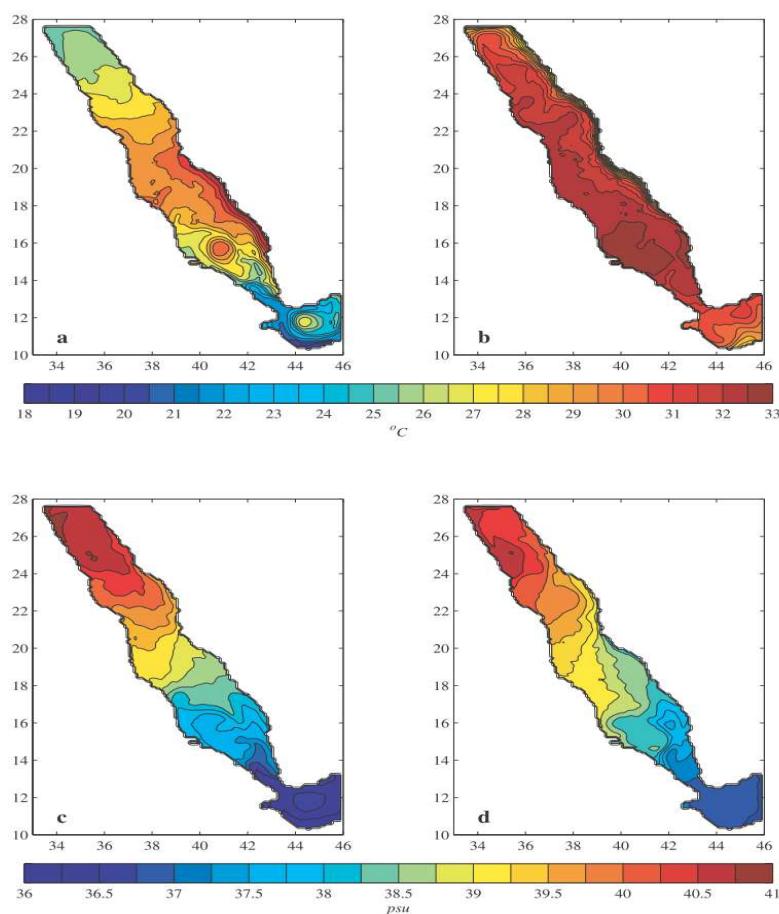


Figure.9: la distribution de la température saisonnière(a)hiver,(b)été et de la salinité(c)hiver,(d)été par le modèle MICOM

4-Les sections verticales de températures et de la salinité :

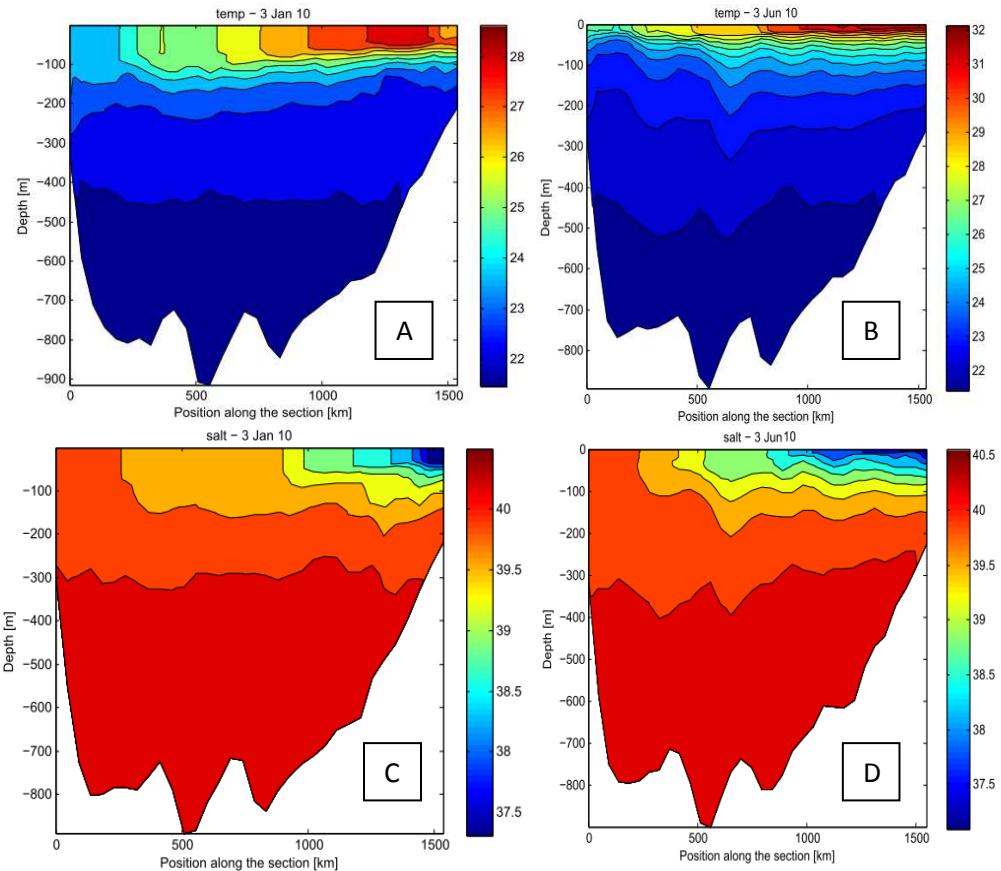


Figure.10: Section verticale de température et de salinité
 (A)T.hiver,(B)T.été,(C)S.hiver,(D)S.été

Les sections verticales de température et de salinité le long de l'axe longitudinal du bassin montre bien le gradient zonal de ces deux paramètres en fonction des saisons

V-CONCLUTION:

Plusieurs défis ont été rencontrés tout au long de l'étude, en particulier en ce qui concerne le choix des coordonnées géographiques de la zone d'étude afin d'avoir une meilleure résolution possible pour pouvoir valider le modèle ROMS sur la mer Rouge. L'étude de simulation numérique sur la mer Rouge présentée ici suggère plusieurs caractéristiques intéressantes de la circulation dans la région. Les constatations les plus importantes comprennent l'intensification de l'écoulement en hiver vers les côtes sud-est et dans certaines parties nord du bassin, corrélé avec la présence d'un courant le long des frontières du bassin, ainsi que la présence du système de tourbillon cyclonique et anticyclonique permanent, et la forte saisonnalité de l'écoulement dans la partie sud du bassin.

Dans l'ensemble, la mer rouge est soumise à de forts variations des forçages du vent qui affectent fortement le flux d'échange au détroit de Bab el Mandeb et l'ensemble de la circulation à l'intérieur du bassin.

De plus, les forçages thermohalines saisonniers semblent être un mécanisme important dans cette très complexe circulation avec un fort gradient de température et de salinité.

Par ailleurs lors de la visualisation de nos résultats, obtenus par le modèle ROMS, on peut constater que la circulation générée par ce modèle est en grande partie identique au schéma de circulation de Sofianos et Johns: OGCM investigation of the redsea circulation 10.1029/2001JC001185, 2003 ,Ce qui valide notre modèle sur cette zone de l'océan mondiale.

BIBLIOGRAPHIE :

- Maillard, C., Eaux intermediaires et formation d'eau profonde en MerRouge, in L'oceanographie physique de la Mer Rouge, pp. 105–133,Cent. Natl. pour l'Exploitation des Oceans, Paris, 1974.
- Patzert, W. C., Volume and heat transports between the Red Sea and Gulf ofAden, notes on the Red Sea heat budget, in L'oceanographie physique de la Mer Rouge, pp. 191–201, Cent. Natl. pour l'Exploitation des Oceans,Paris, 1974b.
- Pedgley, D. E., An outline of the weather and climate of the Red Sea, inL'Oceanographie Physique de la Mer Rouge, pp. 9–27, Cent. Natl. Pour l'Exploitation des Oceans, Paris, 1974.
- Sarantis S. Sofianos and William E. Johns An Oceanic General Circulation Model (OGCM) investigation of the Red Sea circulation vol. 108, NO. C3, 3066, doi:10.1029/2001JC001185, 2003.
- Sofianos, S. S., and W. E. Johns Observations of the summer Red Sea circulation journal of geophysical research. 112, C06025, doi:10.1029/2006JC003886, 2007
- Sofianos, S. S., and W. E. Johns, An Oceanic General Circulation Model(OGCM) investigation of the Red Sea circulation, 1, Exchange betweenthe Red Sea and the Indian Ocean, J. Geophys. Res., 107, 3196,doi:10.1029/2001JC001184, 2002.